

Evaluation des sollicitations induites par des affaissements miniers sur les ouvrages

Olivier Deck, Harlaka Anirudh

Institut National Polytechnique de Lorraine, Laboratoire Environnemental Géomécanique et Ouvrages
Ecole des Mines de Nancy, Parc de Saurupt, 54042 Nancy cedex
olivier.deck@mines.inpl-nancy.fr

Résumé :

Les affaissements miniers sont des mouvements de terrains consécutifs à l'effondrement d'exploitations souterraines (mines et carrières). Ils se caractérisent par une courbure, une déformation horizontale et une mise en pente des terrains. Parmi les méthodes de prévision de la vulnérabilité du bâti, certaines reposent sur l'évaluation de la déformation maximale d'extension dans les structures.

Dans une première partie, cette recherche présente et développe l'une de ces méthodes en distinguant plus précisément l'influence des différents paramètres élastiques du matériau de construction afin que les résultats soient représentatifs d'un ouvrage en maçonnerie.

Dans une deuxième partie, cette recherche s'appuie sur des modélisations numériques incluant le sol, une structure et reproduisant un affaissement minier. Une étude paramétrique est mise en oeuvre pour étudier l'influence de la typologie de la structure, de ses dimensions et des propriétés mécaniques du sol.

Les résultats permettent d'établir des relations pour la prévision de la déformation horizontale du sol transmise à la structure. Associés aux méthodes précédemment développées ces résultats constituent une amélioration dans la prise en compte des phénomènes d'interaction sol-structure pour la prévision de la vulnérabilité des ouvrages en zone d'aléa minier.

Abstract :

Mining subsidence is one of ground movement due to the collapse of underground cavities (mines). When it takes place, the ground is characterized by a curvature, a horizontal strain and a slope. Among existing methods for the assessment of the building vulnerability, some are based on the mechanical calculation of the maximal tension strain in the structures.

The first section presents and improves one of those methods in order to take into account the behaviour of a masonry building.

The second section presents numerical calculations taking into account the soil, the structure and the subsidence. A parametrical study is used to assess the influence of the category of the building, its length and the mechanical properties of the ground.

The results make possible the development of relations for the prediction of the horizontal strain of the ground transmitted to the structure. Combined with the previous methods, these results lead to an improvement of the take into account of the soil-structure interaction phenomena for the prediction of the buildings vulnerability in mining hazard areas.

Mots-clefs : Vulnérabilité, Affaissement Minier, Interaction Sol-structure

1 Introduction

De 1996 à 1999, cinq affaissements miniers se sont produits dans le bassin ferrifère lorrain : deux à Auboué (1996), Auboué (1996), deux à Mouriers (1997)) et un à Roncourt (1999) dont les conséquences matérielles, économiques et sociales ont été très importantes. On a ainsi dénombré, entre autres conséquences, plus de 200 bâtis (maisons et bâtiments) endommagés à Auboué, plus de 100 à Moutiers et une vingtaine à Roncourt. La figure 1 donne une description des mouvements et une illustration de leurs conséquences.

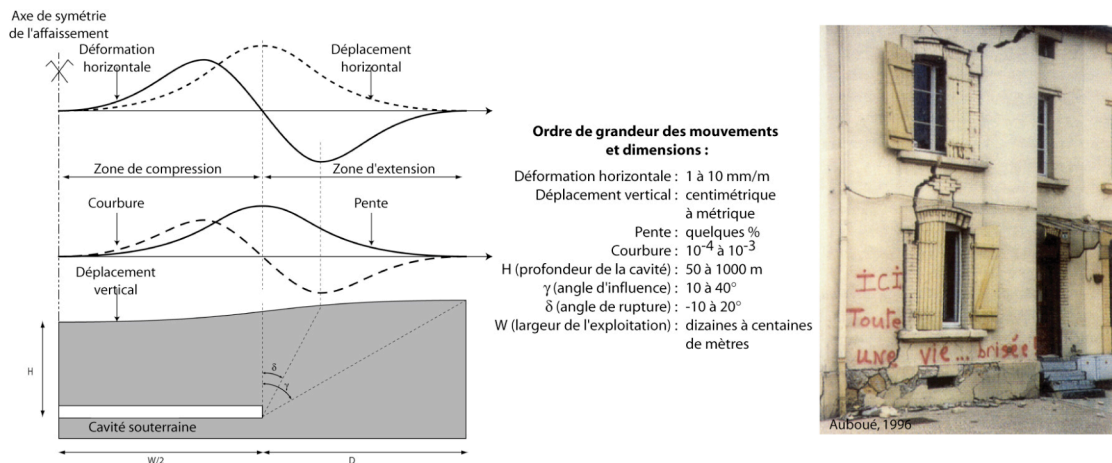


Fig. 1 : Description des mouvements associés à un affaissement minier.

Plusieurs méthodes ont été développées afin d'évaluer la vulnérabilité du bâti. Elles peuvent se classer au sein de 3 familles :

- Les méthodes empiriques basées sur l'utilisation de valeurs seuil (Deck, 2003). Ces méthodes sont les plus simples et reposent sur des observations. Leur principal inconvénient, qui rend leur utilisation peu précise, est qu'elles ne font aucune distinction selon la typologie de l'ouvrage (dimensions, matériaux, système structural...) et la typologie du terrain (propriétés mécaniques en particulier).
- Méthodes empiriques qui associent des valeurs seuil en fonction des caractéristiques des ouvrages et du terrain. Ces méthodes prennent la forme d'abaques ou de méthodes « pondérales » qui permettent d'évaluer la vulnérabilité en sommant des points relatifs à différents critères (Deck, 2003).
- Méthodes analytiques qui visent à évaluer la sollicitation réelle d'une structure. On présente et développe une de ces méthodes au chapitre suivant (Burland et al., 1977).

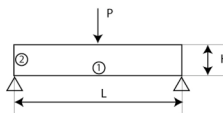
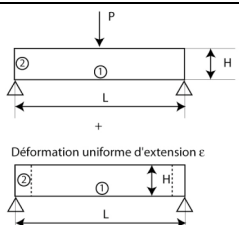
2 Méthode analytique d'évaluation de la sollicitation d'une structure

On utilise et développe la méthode historiquement proposée par Burland et al. (1977) et développée plus récemment par Boscardin et Cording (1989) et Boones (1996). Cette méthode repose sur la modélisation d'une structure par l'une de ses façades, modélisée par une poutre de hauteur « H », longueur « L », largeur « b », reposant sur deux appuis et chargée par un effort ponctuel représentatif de son poids propre. On calcule les déformations d'extension maximales « ϵ_{\max} » dans les zones les plus sollicitées (flexion ou cisaillement) en fonction du rapport Δ/L où Δ est la flèche maximale au centre de la structure et qui correspond à l'effet de la courbure (cf. Boones 1996 pour davantage de détails). On propose ici une modification des formules initiales afin de prendre en compte des valeurs plus réalistes des coefficients élastiques du matériau pour un comportement anisotrope. Pour prendre en compte l'influence des ouvertures (portes et fenêtres sur la rigidité de l'ouvrage et donc la part de déformée induite par le cisaillement) l'usage est de considérer des ratios E/G compris entre 0,5 et 12,5 (pour une structure en maçonnerie) On reprend ici cet intervalle de variation. En revanche, pour le calcul des déformations en zone de cisaillement maximal, on recommande de ne pas conserver la relation entre les paramètres élastiques, pour un matériau isotrope [$E/G = 2(1+\nu)$] car elle aboutit à un coefficient de Poisson compris entre -0,75 et 5,25. On choisit alors de conserver explicitement le coefficient ν pour prendre en compte l'effet de la contrainte principale

secondaire sur la déformation et de ne conserver le ratio E/G que pour le calcul de l'influence du cisaillement dans la déformée totale.

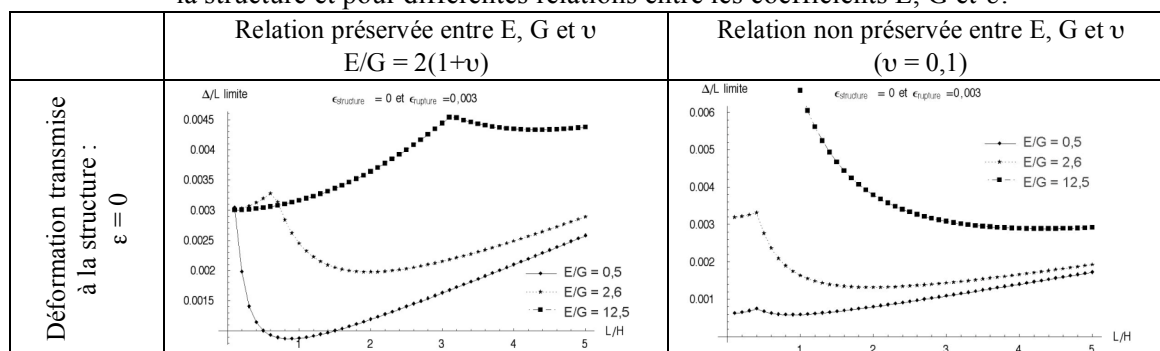
L'effet de la déformation horizontale du terrain peut être modélisé par une déformation imposée, dont la valeur sera discutée dans le chapitre suivant. Elle conduit à une modification des relations liant le ratio Δ/L à la déformation maximale d'extension « ε_{\max} ».

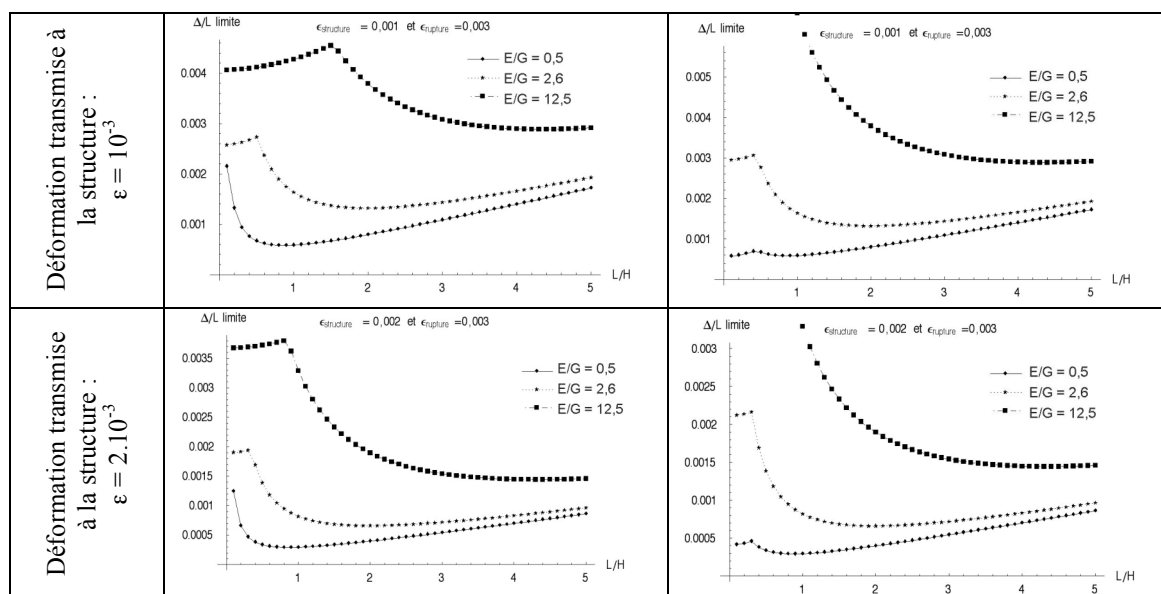
Tab. 1 : Calcul analytique de la déformation maximale de traction dans une structure simulée par une poutre simple.

	Δ	En 1	En 2
	$\Delta/L = \frac{P}{EbH} \left[\frac{L^2}{4H^2} + \frac{3E}{8G} \right]$	$\sigma_{\max} = \frac{3PL}{2bH^2}$ $\sigma_{\min} = 0$ $\Delta/L = \left[\frac{L}{6H} + \frac{HE}{4LG} \right] \varepsilon_{\max}$	$\sigma_{\max} = -\sigma_{\min} = \tau_{\max} = \frac{3P}{4bH}$ $\Delta/L = \frac{L^2}{3(1+\nu)H^2} \left[1 + \frac{3H^2E}{2L^2G} \right] \varepsilon_{\max}$ $\varepsilon_{\max} = \frac{(1+\nu)\Delta/L}{L^2/3H^2 + E/2G}$
	$\Delta/L = \frac{P}{EbH} \left[\frac{L^2}{4H^2} + \frac{3E}{8G} \right]$	$\sigma_{\max} = \frac{3PL}{2bH^2} + E\varepsilon$ $\sigma_{\min} = 0$ $\Delta/L = \left[\frac{L}{6H} + \frac{HE}{4LG} \right] (\varepsilon_{\max} - \varepsilon)$	$\sigma_{\max} = \frac{E\varepsilon}{2} + \sqrt{\left(\frac{E\varepsilon}{2} \right)^2 + \left(\frac{3P}{4bH} \right)^2}$ $\sigma_{\min} = \frac{E\varepsilon}{2} - \sqrt{\left(\frac{E\varepsilon}{2} \right)^2 + \left(\frac{3P}{4bH} \right)^2}$ $\varepsilon_{\max} = \frac{\varepsilon}{2} (1-\nu) + (1+\nu) \sqrt{\left(\frac{\varepsilon}{2} \right)^2 + \left(\frac{\Delta/L}{L^2/3H^2 + E/2G} \right)^2}$
ε : déformation imposée à la structure (valeur positive = extension) ; ε_{\max} : déformation maximale d'extension dans la structure $(\varepsilon_{\max} = \frac{\sigma_{\max}}{E} - \nu \frac{\sigma_{\min}}{E})$; Δ : flèche au centre de la structure ; σ_{\max} et σ_{\min} : contraintes principales (valeur positive = traction)			

Les résultats obtenus sont présentés sur le Tab. 1. On considère une déformation admissible limite en traction pour des ouvrages en maçonnerie de $\varepsilon_{\text{rupture}} = 3.10^{-3}$ (Boscardin et Cording 1989). On met en évidence que l'hypothèse d'une relation préservée entre les paramètres E , G et ν surestime les valeurs de Δ/L admissibles par la structure. Les courbes de résultats (Tab. 2) mettent en évidence deux types de rupture (en zone de cisaillement maximal pour les faibles valeurs de L/H ou en zone de flexion maximale). Les résultats pour des ratios L/H inférieurs à 2 ne sont qu'indicatifs dans la mesure où les hypothèses de la théorie des poutres ne sont plus respectées. Les paramètres de ces courbes liés à l'affaissement (Δ/L et $\varepsilon_{\text{structure}}$) sont les mouvements transmis à la structure et peuvent être très différents des mouvements produits par l'affaissement en l'absence de structure. Ces courbes présentent donc l'inconvénient de ne pas prendre en compte les phénomènes d'interaction sol-structure. Ce point fait l'objet du chapitre suivant.

Tab. 2 : Valeurs de Δ/L limite pour différentes valeurs de la déformation de traction transmise à la structure et pour différentes relations entre les coefficients E , G et ν .





3 Evaluation des déformations transmises à la structure

Les mouvements induits par les affaissements miniers ne se transmettent pas intégralement aux structures en maçonnerie dont la rigidité est très supérieure à celle du terrain. La déformation horizontale transmise est donc moindre que la déformation du terrain qui se développe en l'absence de structure. La valeur de la flèche transmise « Δ » est également inférieure à la flèche théorique, en raison du tassement du terrain sous les fondations vers lesquelles transitent les charges additionnelles consécutives à la courbure du terrain. Des modélisations numériques ont été entreprises en vue d'évaluer la proportion de la déformation horizontale transmise effectivement à la structure dans le cas d'un affaissement minier.

Le modèle numérique est composé de deux couches de sol superposées, d'une hauteur de 50 m et d'une longueur de 500 m (Fig. 2). Les déplacements horizontaux sont bloqués sur les frontières latérales et l'affaissement est modélisé en imposant un déplacement vertical sur la moitié de la frontière inférieure. La couche de terrain élastique doit être appréhendée comme un moyen de solliciter la couche élastoplastique (critère de Mohr-Coulomb non associé) par des mouvements imposés réalistes composés de déplacements verticaux et horizontaux variant progressivement sur toute la longueur. Cette stratégie permet de ne pas provoquer une plastification importante de la zone de transition entre la demi-frontière inférieure où les déplacements sont imposés et la demi-frontière où les déplacements sont bloqués. L'objectif de ce modèle n'est pas de prévoir ou reproduire le comportement des terrains en profondeur, mais de reproduire les mouvements en surface afin de permettre l'étude des phénomènes d'interaction sol-structure. Les déplacements ainsi obtenus ont été validés par comparaison avec des formules mathématiques empiriques.

Tab. 3: Propriétés mécaniques du terrain utilisées pour l'étude paramétrique.

	Propriétés mécaniques	Dimensions
Terrain élastique	$E = 50 \text{ MPa}, 200 \text{ MPa ou } 350 \text{ MPa}$ $\nu = 0,3$	500 m de long, 50 m de hauteur
Terrain élastoplastique	$E = 50 \text{ MPa}, 200 \text{ MPa ou } 350 \text{ MPa}$ $\nu = 0,3$ Angle de frottement " φ " : $30^\circ, 40^\circ \text{ ou } 50^\circ$ Angle de dilataance " ψ " : $2/3 \varphi$	500 m de long, 50 m de hauteur

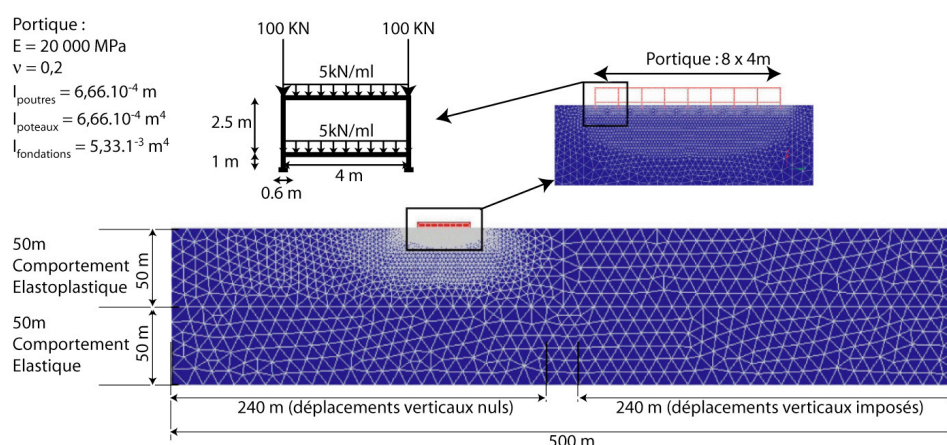


Fig. 2 : Géométrie du modèle numérique (logiciel CESAR-LCPC V.4.0.5).

Deux types de structures ont été considérés afin d'étudier différents phénomènes d'interaction sol-structure en fonction de la rigidité relative de l'ouvrage par rapport au terrain. Pour modéliser une structure rigide, on a considéré un radier en béton élastique posé à la surface du modèle (épaisseur de 50 cm, $E = 20\,000$ MPa, $\nu = 0,2$). Pour modéliser une structure « souple », on a considéré un portique en béton partiellement enterré au niveau de ses fondations (dimensions et propriétés sur la Fig. 2). Ces structures sont chargées par des efforts répartis (10 kN/ml de structure) et ponctuels (100 kN tous les 4m).

Le modèle est utilisé pour réaliser une étude paramétrique. On ne présente, ici que les résultats pour une structure située dans la zone d'extension. Trois longueurs sont étudiées : 8 m, 16 m et 32 m. Des calculs sont réalisés pour différentes propriétés mécaniques du sol. Trois modules de Young pour les couches élastique et élastoplastique et trois angles de frottements pour la couche élastoplastique (Tab. 3). Enfin, les calculs sont également réalisés pour différentes valeurs de l'affaissement vertical (0,5 m ; 1 m ; 1,5m et 2m), ce qui conduit à différentes valeurs de la déformation horizontale à la surface. Le modèle est sollicité en deux phases. La première pour modéliser l'effet du tassement de la structure et la seconde pour modéliser l'effet de l'affaissement. Les résultats obtenus permettent :

- d'identifier les phénomènes d'interaction sol-structure selon le type de structure, la zone considérée (extension ou compression) et les propriétés mécaniques (résultats non présentés ici) ;
- d'évaluer la fraction de la déformation horizontale du terrain qui est effectivement transmise à l'ouvrage en comparant la déformation au niveau de la structure avec celle obtenue sans structure. Ce sont ces résultats qui sont présentés ici.

Lorsque tous les calculs sont réalisés, on obtient 120 résultats. Ces résultats sont alors analysés par les techniques de régression linéaires afin d'obtenir une relation entre la déformation transmise à la structure « $\epsilon_{\text{transmis}}$ », la déformation initiale « $\epsilon_{\text{initial}}$ » et les propriétés géométrique et mécanique du modèle. Le Tab. 4 présente le résultat le plus satisfaisant pour une structure de type portique et une structure de type radier. Les différents modèles qu'on peut obtenir sont jugés en fonction des critères traditionnels de ce type d'analyse (normalité des variables à expliquer et des variables explicatives ; test global du modèle et test local de chaque variable ; recherche d'éventuels effets leviers ou de défauts d'ajustement...). On a également cherché à identifier d'éventuelles interactions entre les variables..

Les résultats mettent en évidence un comportement différent des deux types de structures. Pour une structure rigide (radier) seuls la déformation initiale du terrain et l'angle de frottement

du sol apparaissent corrélés à la déformation transmise. Pour une structure « souple » (portique), l'importance du module de Young du terrain et de la longueur de l'ouvrage sont également identifiés. Globalement, on observe un taux de transmission de la déformation horizontale de 20% à 35% pour une structure rigide et 25 à 60% pour une structure « souple ».

Tab. 4 : Résultats des régressions linéaires pour l'évaluation de la déformation horizontale transmise à la structure.

	Paramètre estimé	Ecart type	t ratio	prob >t	Intervalle de confiance à 95 %	
					Inférieur	Supérieur
Cas du radier (écart type des résidus 0,22 ; R ² = 0,93) Modèle final : $\epsilon_{transmis} = 0,79 + 0,34 \epsilon_{initiale} - 0,022 \varphi \pm 0,44$ (à 95%)						
Constante	7.9E-01	1.4E-01	5.5E+00	1.1E-06	5.0E-01	1.1E+00
	3.4E-01	1.2E-02	2.8E+01	1.1E-34	3.2E-01	3.7E-01
φ	-2.2E-02	3.2E-03	-7.0E+00	2.7E-09	-2.9E-02	-1.6E-02
Cas du portique (écart type des résidus 0,3 ; R ² = 0,9) Modèle final : $\epsilon_{transmis} = 0,78 + 0,38 \epsilon_{initiale} - 0,008 \varphi - 0,036 L + 0,0024 E \pm 0,6$ (à 95%)						
Constante	7.8E-01	2.2E-01	3.6E+00	6.7E-04	3.5E-01	1.2E+00
E	2.4E-03	3.1E-04	7.6E+00	4.2E-10	1.8E-03	3.0E-03
φ	-8.0E-03	4.3E-03	-1.9E+00	6.8E-02	-1.7E-02	6.2E-04
L	-3.6E-02	3.6E-03	-1.0E+01	4.3E-14	-4.3E-02	-2.9E-02
ε _{initial}	3.8E-01	1.7E-02	2.2E+01	1.6E-28	3.4E-01	4.1E-01
E : module de Young du terrain [MPa] ; φ : angle de frottement du terrain [°] ; L : longueur de la structure [m] ; ε _{initial} : déformation horizontale en l'absence de structure [mm/m] ; ε _{transmis} : déformation horizontale transmis à la structure [mm/m]						

4 Conclusions

Les travaux présentés contribuent à l'élaboration d'abaques permettant d'évaluer les mouvements admissibles par une structure située en zone soumise à des mouvements du sol d'origine minier. Les résultats obtenus montrent une évolution des abaques initialement développés par Burland et al. (1977) en considérant séparément le ratio E/G qui pilote l'influence du cisaillement dans la déformée d'une poutre et le coefficient de Poisson qui pilote l'effet de la contrainte principale secondaire sur la déformation de traction du matériau. Par ailleurs, des modélisations numériques ont permis de réaliser une étude paramétrique afin d'identifier l'importance de paramètres géométriques et mécaniques dans la transmission de la déformation du sol à la structure. Des régressions linéaires ont permis de proposer des formules de prévision de la déformation horizontale transmise à la structure. En prenant en compte cette déformation au lieu de la déformation initiale du sol, l'utilisation des abaques permet de prendre en compte de manière simplifiée les phénomènes d'interaction sol-structure. Les résultats obtenus sont encourageants, mais nécessitent d'être consolidés par des études complémentaires.

Références

- Boone, S.J. 1996. Ground Movement Related Building Damage, *J. Of Geotech. Eng.*, ASCE, **122**(11), 886 - 896.
- Boscardin M.D., Cording E.J. 1989. Building response to excavation-induced settlement. *J. Of Geotech. Eng.*, ASCE, **115**(1).
- Burland J. B., Broms B. B. et De Mello V. F. B. 1977. Behaviour of foundations and structures. *9th Int.conf. on soil mechanics and foundations engineering*, pp. 495-546.
- Burland, J.B., Mair R.J. And Standing J.R. 2004. Ground Performance and Building Response Due To Tunnelling. *Advances In Geotechnical Engineering*, Eds R.J.Jardine, D.M.Potts And K.G.Higgins, Institution Of Civil Engineers, Vol.1, 291-342
- Deck O., Al Heib M., Homand F, Gueniffey Y et Wojtkowiak F 2003. Méthode de prévision des dégradations des structures bâties en zone d'affaissement minier. *Revue Française de Géotechnique*, **100**, pp. 15-33.